

**19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENTAMT**

Offenlegungsschrift
DE 197 14 610 A 1

21 Aktenzeichen: 197 14 610.4
 22 Anmeldetag: 9. 4. 97
 43 Offenlegungstag: 15. 10. 98

(51) Int. Cl.⁶:
H 02 N 2/06
 B 06 B 1/06
 // F02D 41/20, F02M
 51/00

DE 197 14 610 A1

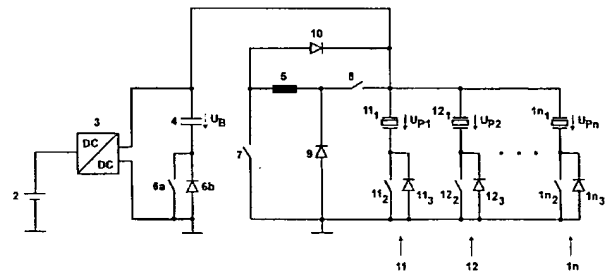
71 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock,
Alexander, 70435 Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements

57) Es werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots, 1n_1$) beschrieben. Das Verfahren und die Vorrichtung zeichnen sich dadurch aus, daß wenigstens entweder das Laden oder das Entladen zumindest teilweise unter Verschieben von Ladungen zwischen dem zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element und einem oder mehreren nicht zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element(en) erfolgt. Damit ist es auf einfache und elegante Weise möglich, auch unter beengten Verhältnissen ein effizientes Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente durchzuführen.



DE 197 14 610 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 11, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft. Zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend teilweise bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

Zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements sind zwei grundlegende Prinzipien bekannt, nämlich das Laden und Entladen über einen ohmschen Widerstand oder das Laden und Entladen über eine Spule, wobei sowohl der ohmsche Widerstand als auch die Spule unter anderem dazu dienen, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen.

Die erste Variante, d. h. das Laden und Entladen über einen ohmschen Widerstand ist in Fig. 5 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element, welches in der Fig. 5 mit dem Bezugszeichen 101 bezeichnet ist, ist mit einem Ladetransistor 102 und einem Entladetransistor 103 verbunden.

Der Ladetransistor 102 wird durch einen Ladeverstärker 104 angesteuert und verbindet im durchgeschalteten Zustand das piezoelektrische Element 101 mit einer positiven Versorgungsspannung; der Entladetransistor 103 wird durch einen Entladeverstärker 105 angesteuert und verbindet im durchgeschalteten Zustand das piezoelektrische Element 101 mit Masse.

Im durchgeschalteten Zustand des Ladetransistors 102 fließt über diesen ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 geladen wird. Mit zunehmender Ladung des piezoelektrischen Elements 101 steigt die sich an diesem einstellende Spannung, und dementsprechend verändern sich auch dessen äußere Abmessungen. Ein Sperren des Ladetransistors 102, also ein Unterbrechen oder Beenden des Ladevorganges bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 im wesentlichen unverändert beibehalten werden.

Im durchgeschalteten Zustand des Entladetransistors 103 fließt über diesen ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 entladen wird. Mit zunehmender Entladung des piezoelektrischen Elements 101 sinkt die sich an diesem einstellende Spannung, und dementsprechend

verändern sich auch dessen äußere Abmessungen. Ein Sperren des Entladetransistors 103, also ein Unterbrechen oder Beenden des Entladevorganges bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element 101 noch gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 beibehalten werden.

Der Ladetransistor 102 und der Entladetransistor 103 wirken für den Ladestrom bzw. für den Entladestrom wie steuerbare ohmsche Widerstände. Die dadurch gegebene Steuerbarkeit des Ladestroms und des Entladestroms ermöglicht es, den Ladevorgang und den Entladevorgang genau wunschgemäß ablaufen zu lassen. Der durch den Ladetransistor 102 fließende Ladestrom und der durch den Entladetransistor 103 fließende Entladestrom erzeugen dort jedoch nicht unerhebliche Verlustleistungen. Die in den Transistoren verbrauchte Verlustenergie ist pro Lade-Entladezyklus mindestens doppelt so hoch wie die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Energie. Diese hohe Verlustenergie bewirkt eine sehr starke Aufheizung des Ladetransistors 102 und des Entladetransistors 103, was erkennbar ein Nachteil ist.

Das betrachtete Lade- und Entladeverfahren ist daher insbesondere dann, wenn häufige und/oder umfangreiche Lade- und Entladevorgänge durchzuführen sind, entweder gänzlich unbrauchbar oder allenfalls eingeschränkt brauchbar.

Nicht zuletzt deshalb kommt häufig die vorstehend bereits erwähnte zweite Variante zum Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements, d. h. das Laden und Entladen über eine Spule zum Einsatz; eine praktische Realisierung dieser zweiten Variante ist in Fig. 6 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element, welches in der Fig. 6 mit dem Bezugszeichen 201 bezeichnet ist, ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter 202 schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter 206 schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters 202, einer Diode 203, einer Ladespule 204, des piezoelektrischen Elements 201, und einer Spannungsquelle 205 besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters 206, einer Diode 207, einer Entladespule 208 und des piezoelektrischen Elements 201 besteht.

Die Diode 203 des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann. Die Diode 203 und der Ladeschalter 202 sind gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Die Diode 207 des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann. Die Diode 207 und der Entladeschalter 206 sind wie die Diode 203 und der Ladeschalter 202 gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter 202 geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 201 geladen wird; die im piezoelektrischen Element 201 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 201 werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter 206 geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 201 entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements 201 bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 201 werden nach dem

Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Da bei Schaltungen gemäß der Fig. 6 sowohl der Ladestromkreis als auch der Entladestromkreis frei von nennenswerten ohmschen Widerständen sind, ist die durch das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements (die durch das Fließen des Ladestroms und des Entladestroms durch ohmsche Widerstände) erzeugte Wärmeenergie äußerst gering.

Andererseits wird aber für die praktische Realisierung derartiger Schaltungen insbesondere wegen der nicht unerheblichen Größe der Ladespule 204 und der Entladespule 208 relativ viel Platz benötigt, wodurch das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen über Spulen in bestimmten Fällen nicht oder jedenfalls nicht ohne weiteres möglich ist.

Schaltungen der in der Fig. 6 gezeigten Art und Verfahren zum Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente unter Verwendung derartiger Schaltungen sind aus den eingangs bereits erwähnten Druckschriften EP 0 371 469 B1 und EP 0 379 182 B1 bekannt.

Die unter Bezugnahme auf die Fig. 5 und 6 dem grundlegenden Prinzip nach beschriebenen Verfahren und Vorrichtungen zum Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente sind Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. Vorrichtungen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 11.

Den bekannten Verfahren und Vorrichtungen ist gemeinsam, daß sie vor allem dann, wenn die zu ladenden und entladenden piezoelektrischen Elemente schnell ladbar und entladbar sein sollen, für zumindest kurzzeitig sehr hohe Lade- und Entladeströme ausgelegt sein müssen. Eine Folge hiervon ist, daß die Versorgungsspannungsquellen entsprechend groß dimensioniert sein müssen. Dies kann insbesondere dann, wenn eine Vielzahl der bekannten Vorrichtungen vorzusehen ist, um eine Vielzahl von piezoelektrischen Elementen laden oder entladen zu können, eine nicht unerhebliche Größe der Anordnung zur Folge haben. Aufgrund dessen kann sich der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Aktoren bzw. Stellglieder unter beengten Verhältnissen als schwierig oder gänzlich unmöglich erweisen. Dies ist erkennbar ein Nachteil, den es zu beseitigen gilt.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 11 derart weiterzubilden, daß dadurch auch unter beengten Verhältnissen ein effizientes Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente ermöglicht wird.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) und durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 11 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

Demnach ist vorgesehen,

- daß wenigstens entweder das Laden oder das Entladen zumindest teilweise unter Verschieben von Ladungen zwischen dem zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element und einem oder mehreren nicht zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element(en) erfolgt (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.
- daß Mittel vorgesehen sind, welche es ermöglichen, daß wenigstens entweder das Laden oder das Entladen zumindest teilweise unter Verschieben von Ladungen zwischen dem zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element und einem oder mehreren nicht zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element(en) erfolgen kann (kennzeichnender Teil des Pa-

tentanspruchs 11).

Die piezoelektrischen Elemente werden demnach nicht nur als Aktoren oder Stellglieder, sondern auch als Ladungsspeicher verwendet.

Die Ausnutzung der Ladungsspeicher-Funktion der piezoelektrischen Elemente ermöglicht es, das Laden eines zu ladenden piezoelektrischen Elements nicht mehr oder jedenfalls nicht mehr vollständig unmittelbar über die Versorgungsspannungsquelle, sondern zumindest teilweise unter Heranholen von in nicht zu ladenden piezoelektrischen Elementen gespeicherten Ladungen durchzuführen, wobei die von den nicht zu ladenden piezoelektrischen Elementen herangeholten Ladungen beim Entladen des zu ladenden piezoelektrischen Elements wieder dorthin zurückgespeichert werden können.

Die Verwendung der piezoelektrischen Elemente als Ladungsspeicher bewirkt keine Schwankungen in deren Abmessungen, wenn die piezoelektrischen Elemente mechanisch vorgespannt sind; auf eine mechanische Vorspannung kann ganz oder teilweise verzichtet werden, wenn die bei der Verwendung der piezoelektrischen Elemente als Ladungsspeicher auftretenden Abmessungsveränderungen nicht ausreichen, um die piezoelektrischen Elemente als Aktoren bzw. Stellglieder wirken zu lassen.

Im Idealfall, also wenn bei den Umladevorgängen keine Energie verloren ginge und wenn die piezoelektrischen Elemente in einer Anzahl vorhanden wären, die ausreicht, um im "nur" vorgeladenen Zustand so viele Ladungen zu speichern, daß diese, wenn sie in ein zu ladendes piezoelektrisches Element umgeladen werden, ausreichen, um dieses vollständig oder jedenfalls wunschgemäß weit zu laden, würde die Versorgungsspannungsquelle nur benötigt, um die piezoelektrischen Elemente bei der Inbetriebnahme der Anordnung vorzuladen; das spätere (sequentielle oder gleichzeitige) Laden und Entladen beliebiger einzelner oder mehrerer der vorhandenen piezoelektrischen Elemente könnte dann ausschließlich durch ein entsprechendes Umladen bzw. Verschieben der vorhandenen Ladungen erfolgen. Das anfängliche Vorladen der piezoelektrischen Elemente durch die Versorgungsspannungsquelle kann dabei, da die piezoelektrischen Elemente zu diesem Zeitpunkt noch nicht als Aktoren bzw. Stellglieder wirken müssen, relativ langsam vorstatten gehen, wodurch die Versorgungsspannungsquelle nicht einmal für kurzzeitig hohe Leistungen ausgelegt sein muß und dementsprechend klein ausgebildet werden kann.

Dies gilt auch für den Fall, daß die vorstehend erwähnten idealen Verhältnisse nicht vorliegen, die Versorgungsspannungsquelle also während des Betriebs der Anordnung für ein mehr oder weniger umfangreiches Nachladen der piezoelektrischen Elemente sorgen muß; selbst dann muß die Versorgungsspannungsquelle bei weitem nicht für die Leistungen ausgelegt werden, die erbracht werden müßten, wenn das Laden und Entladen der piezoelektrischen Elemente ohne Ladungsverschiebung zwischen den vorhandenen piezoelektrischen Elementen erfolgen würde.

Die Versorgungsspannungsquelle kann dadurch größtmäßig auf ein Minimum reduziert werden. Darüber hinaus kann auch ein der Versorgungsspannungsquelle nachgeschalteter Pufferkondensator verkleinert oder weggelassen werden.

Es wurden also ein Verfahren und eine Vorrichtung gefunden, durch die es auf einfache Weise möglich ist, auch unter beengten Verhältnissen ein effizientes Laden und Entladen durchzuführen.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel einer zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeigneten erfindungsgemäßen Schaltung,

Fig. 2 den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Schaltung gemäß **Fig. 1** einstellenden Spannungs- und Stromverläufen,

Fig. 3 ein zweites Ausführungsbeispiel einer zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeigneten erfindungsgemäßen Schaltung,

Fig. 4 den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Schaltung gemäß **Fig. 3** einstellenden Spannungs- und Stromverläufen,

Fig. 5 eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über für den Lade- und Entladestrom als ohmsche Widerstände wirkende Elemente, und

Fig. 6 eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über für den Lade- und Entladestrom als Spulen wirkende Elemente.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entladen im folgenden näher beschrieben wird, sind beispielsweise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbesondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Einsatz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich das jeweils zu ladende bzw. entladende piezoelektrische Element im Ansprechen auf das Laden ausdehnt und im Ansprechen auf das Entladen zusammenzieht. Die Erfindung ist selbstverständlich jedoch auch dann anwendbar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Wenn zuvor oder später von einem "zu ladenden" piezoelektrischen Element die Rede ist, so ist darunter in der Regel zu verstehen, daß das betreffende piezoelektrische Element so stark aufzuladen ist, daß es infolge der dadurch bewirkten Ausdehnung desselben als Aktor bzw. Stellglied wirken kann. Zwar können, wie nachfolgend noch ausführlich beschrieben werden wird, auch in diesem Sinne nicht "zu ladende" piezoelektrische Elemente geladen werden, doch muß eine dadurch gegebenenfalls bewirkte Ausdehnung derselben so gering bleiben, daß die betreffenden piezoelektrischen Elemente noch nicht als Aktor oder Stellglied wirken können.

Umgekehrt ist unter einem Entladen von "zu entladenden" piezoelektrischen Elementen in der Regel zu verstehen, daß piezoelektrische Elemente, die so stark geladen sind, daß sie als Aktor oder Stellglied wirken können, aus ihrem aktiven Zustand in einen inaktiven Zustand versetzt werden, in welchem sie nicht mehr als Aktor oder Stellglied wirken können. Zwar können, wie nachfolgend noch ausführlich beschrieben werden wird, auch inaktive piezoelektrische Elemente entladen werden, doch bewirkt dies nicht den erwähnten Übergang vom aktiven in den inaktiven Zustand.

Die piezoelektrischen Elemente, die durch die nachfolgend beschriebenen Vorrichtungen und Verfahren geladen und entladen werden sollen, sind mehr oder weniger stark mechanisch vorgespannt. Dadurch dehnen sie sich nicht schon während eines noch genauer beschriebenen Vor- und/oder Nachladens aus; bevor sie sich ausdehnen und als Ak-

tor bzw. Stellglied wirken können, müssen sie (naturgemäß ohne Änderung ihrer Abmessungen) die Vorspannkraft überwinden.

Zusätzlich oder alternativ hierzu können die piezoelektrischen Elemente so angeordnet sein, daß eine während des Vor- oder Nachladens auftretende Größenveränderung keine oder jedenfalls keine wesentlichen Auswirkungen auf das die piezoelektrischen Elemente enthaltende System hat, die piezoelektrischen Elemente also noch nicht als Aktor oder Stellglied wirken können.

Es wird nun unter Bezugnahme auf **Fig. 1** ein erstes Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Schaltung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements beschrieben.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel jeweils zu laden bzw. zu entladen gilt, ist eines aus einer Vielzahl von piezoelektrischen Elementen, die nacheinander zu laden und zu entladen sind.

Die piezoelektrischen Elemente, aus denen das zu ladende und entladende piezoelektrische Element jeweils ausgewählt wird, sind in parallel geschalteten Piezozweigen **11**, **12**, ... **1n** enthalten und mit den Bezugszeichen **11**, **12**, ... **1n** bezeichnet.

Von den piezoelektrischen Elementen **11**, **12**, ... **1n** möge das piezoelektrische Element **11** zur Ansteuerung einer ersten Zylinder einer Brennkraftmaschine zugeordneten Einspritzdüse, das piezoelektrische Element **12** zur Ansteuerung einer zweiten Zylinder einer Brennkraftmaschine zugeordneten Einspritzdüse, und das piezoelektrische Element **1n** zur Ansteuerung einer n-ten Zylinder einer Brennkraftmaschine zugeordneten Einspritzdüse dienen. Die piezoelektrischen Elemente werden daher in einer vorbestimmten Reihenfolge aufeinanderfolgend geladen und entladen.

Jeder der Piezozweige **11**, **12**, ... **1n** enthält in Reihe zu dem jeweiligen piezoelektrischen Element **11**, **12**, ... **1n** einen Auswahlwähler **11**, **12**, ... **1n** mit parallel geschalteter Diode **11**, **12**, ... **1n**. Über die Auswahlwähler **11**, **12**, ... **1n** ist bestimmbar, ob das im jeweiligen Piezozweig **11**, **12**, ... **1n** enthaltene piezoelektrische Element **11**, **12**, ... **1n** während eines Ladevorganges geladen werden soll (zugeordneter Auswahlwähler geschlossen) oder nicht (zugeordneter Auswahlwähler geöffnet).

Die Auswahlwähler **11**, **12**, ... **1n** und die parallel dazu angeordneten Dioden **11**, **12**, ... **1n** können jeweils als elektronische Schalter mit parasitären Dioden wie beispielsweise MOS-FETs realisiert werden.

Neben den Piezozweigen **11**, **12**, ... **1n** enthält die in der **Fig. 1** gezeigte Schaltung eine aus einer Batterie **2** und einem Gleichspannungswandler **3** bestehende Versorgungsspannungsquelle, einen Kondensator **4**, ein als Induktanz wirkendes Element in Form einer Spule **5**, einen Vorladeschalter **6a** mit parallel geschalteter Diode **6b**, einen ersten Hauptlade- und Entladeschalter **7**, einen zweiten Hauptlade- und Entladeschalter **8** sowie Dioden **9** und **10**.

Der Vorladeschalter **6a** und die parallel dazu angeordnete Diode **6b** können dabei durch einen elektronischen Schalter mit parasitärer Diode wie beispielsweise einen MOS-FET realisiert werden.

Durch die genannte Versorgungsspannungsquelle (Batterie **2** mit nachgeschaltetem Gleichspannungswandler **3**) wird die Spannung der Batterie (beispielsweise die 12 V einer Kraftfahrzeugbatterie) in eine im wesentlichen beliebige andere Gleichspannung umgesetzt und als Versorgungsspannung bereitgestellt.

Der weitere Aufbau der Schaltung gemäß **Fig. 1** läßt sich am einfachsten anhand deren Funktion und Wirkungsweise

beim Laden und Entladen eines der piezoelektrischen Elemente beschreiben und nachvollziehen.

Die Funktion und die Wirkungsweise der Schaltung gemäß Fig. 1 werden nun anhand des Ladens und des Entladens des piezoelektrischen Elements 11_1 beschrieben.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist ein Zustand, in dem sämtliche Schalter geöffnet und die piezoelektrischen Elemente sowie der Kondensator im wesentlichen entladen sind.

Das Laden des piezoelektrischen Elements 11_1 vollzieht sich in zwei Stufen, genauer gesagt in einer Vorladestufe und einer sich unmittelbar oder beliebig später daran anschließenden Hauptladestufe.

Die Vorladestufe wird durch das Schließen des Vorladeschalters $6a$ und der Auswahlshalter $11_2, 12_2, \dots, 1n_2$ eingeleitet. Das Schließen der besagten Schalter bewirkt, daß der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ parallel geschaltet und mit dem Gleichspannungswandler 3 verbunden werden. Dadurch werden der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ auf eine erste (niedrige) Spannung aufgeladen.

Die besagte erste Spannung ist so bemessen, daß einerseits die darauf aufgeladenen piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ noch nicht als Aktoren bzw. Stellglieder wirken, und daß andererseits die dadurch im Kondensator 4 und den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ gespeicherte Energie ausreicht, um eines der piezoelektrischen Elemente vollständig (wünschgemäß weit) aufzuladen.

Nach diesem Vorladen des Kondensators 4 und der piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ werden der Vorladeschalter $6a$ und die Auswahlshalter $11_2, 12_2, \dots, 1n_2$ wieder geöffnet. Dadurch werden der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ voneinander und vom Gleichspannungswandler 3 getrennt.

Die im Kondensator 4 und in den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ gespeicherten Ladungen bleiben dort im wesentlichen unverändert erhalten.

Ausgehend von diesem Zustand kann nun zu einem beliebigen Zeitpunkt das vollständige Laden des piezoelektrischen Elements 11_1 (oder eines beliebigen anderen der piezoelektrischen Elemente) durchgeführt werden. Dies geschieht in der vorstehend bereits erwähnten Hauptladestufe.

Die Hauptladestufe umfaßt zwei Teilschritte; sie, genauer gesagt der erste Teilschritt derselben wird durch ein Schließen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 eingeleitet. Das Schließen der besagten Schalter bewirkt die Ausbildung eines ersten und eines zweiten geschlossenen Umladestromkreises, wobei der erste Umladestromkreis aus einer Reihenschaltung des Kondensators 4 , der Diode $6b$ und der Spule 5 besteht, und wobei der zweite Umladestromkreis aus einer Parallelschaltung der parallelen Piezozweige $11, 12, \dots, 1n$ und der Spule 5 besteht.

In den Umladestromkreisen stellt sich durch das Schließen derselben ein (Umlade-)Stromfluß ein, durch den die im Kondensator 4 und in den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ gespeicherten Ladungen (gespeicherte elektrische Energie) zur Spule 5 fließen und dort in Form von magnetischer Energie gespeichert werden. Die Spule 5 ist vorzugsweise so dimensioniert, daß die gesamte elektrische Energie des Kondensators 4 und der piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ in dieser speicherbar ist. Wenn die gesamte elektrische Energie oder wünschgemäß viel Energie aus dem Kondensator 4 und den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ in die Spule 5 transferiert ist, werden der erste Hauptlade- und Entladeschalter 7 und der zweite Hauptlade- und Entladeschalter 8 wieder geöffnet.

Mit dem Öffnen des ersten Hauptlade- und Entladeschal-

ters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 endet der erste Hauptladestufen-Teilschritt und beginnt der zweite Hauptladestufen-Teilschritt.

Gleichzeitig mit dem Öffnen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 oder schon vorher wird der Auswahlshalter des zu ladenden piezoelektrischen Elements, im betrachteten Beispiel also der dem piezoelektrischen Element 11_1 zugeordnete Auswahlshalter 11_2 geschlossen; dadurch wird ein Schließen eines das piezoelektrische Element 11_1 , die Diode 9 , die Spule 5 und die Diode 10 enthaltenden Ladestromkreises bewirkt.

In diesem Ladestromkreis stellt sich auf das Öffnen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 ein (Lade-)Stromfluß ein, durch welchen die in der Spule 5 gespeicherte Energie in das zu ladende piezoelektrische Element 11_1 umgeladen wird.

Durch den Ladestromfluß wird das piezoelektrische Element zunehmend geladen, wodurch die sich an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zunehmen. Wie eingangs bereits angedeutet wurde, ist das piezoelektrische Element mechanisch so vorgespannt oder so angeordnet, daß es erst jetzt (im zweiten Hauptladestufen-Teilschritt) als Aktor bzw. Stellglied wirken kann; in der anfänglichen Vorladestufe blieben die Abmessungen des piezoelektrischen Elements konstant (wenn es mechanisch vorgespannt ist) bzw. Veränderungen der Abmessungen ohne Auswirkungen auf das zu betätigende oder zu verstellende Element (wenn das piezoelektrische Element so angeordnet ist, daß eine gewisse Mindestausdehnung desselben erreicht sein muß, bevor eine Betätigung oder Verstellung des zu betätigenden oder verstellenden Elements erfolgen kann).

Wenn die in der Spule 5 gespeicherte Energie vollständig oder wünschgemäß weit in das zu ladende piezoelektrische Element umgespeichert ist, wird der Auswahlshalter 11_2 und damit auch der Ladestromkreis wieder geöffnet. Damit ist der zweite Hauptladestufen-Teilschritt und mithin der gesamte Ladevorgang beendet.

In diesem Zustand ist das piezoelektrische Element 11_1 (oder ein anderes der piezoelektrischen Elemente) im wesentlichen vollständig (wünschgemäß weit) geladen, während die anderen piezoelektrischen Elemente und der Kondensator 4 im wesentlichen vollständig entladen sind.

Die im piezoelektrischen Element 11_1 gespeicherten Ladungen, die sich dadurch am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Abmessungen des piezoelektrischen Elements bleiben in diesem Stadium (bis zum Entladen) im wesentlichen unverändert erhalten.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements vollzieht sich wie die Hauptladestufe in zwei Teilschritten; es, genauer gesagt der erste Entlade-Teilschritt wird durch ein Schließen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 eingeleitet. Das Schließen dieser Schalter bewirkt das erneute Schließen des ersten und des zweiten Umladestromkreises.

In den Umladestromkreisen stellt sich dadurch ein (Umlade-) Stromfluß ein, durch den die im geladenen piezoelektrischen Element 11_1 gespeicherten Ladungen (gespeicherte elektrische Energie) über die Diode 11_3 zur Spule 5 fließen und dort in Form von magnetischer Energie gespeichert werden. Die Spule 5 ist vorzugsweise so dimensioniert, daß die gesamte elektrische Energie des geladenen piezoelektrischen Elements 11_1 in dieser speicherbar ist.

Durch das Umladen nehmen die sich am piezoelektrischen Element 11_1 einstellende Spannung und die äußeren Abmessungen ab.

Wenn die gesamte elektrische Energie des piezoelektrischen Elements 11_1 in die Spule 5 transferiert ist, werden der

erste Hauptlade- und Entladeschalter 7 und der zweite Hauptlade- und Entladeschalter 8 wieder geöffnet.

Mit dem Öffnen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 endet der erste Entlade-Teilschritt und beginnt der zweite Entlade-Teilschritt.

Gleichzeitig mit dem Öffnen des ersten Hauptlade- und Entladeschalters 7 und des zweiten Hauptlade- und Entladeschalters 8 oder schon vorher werden der Vorladeschalter 6a und alle Auswahlwähler 11₂, 12₂, . . . 1n₂ geschlossen; dadurch kann die in der Spule 5 gespeicherte Energie in den Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente 11₁, 12₁, . . . 1n₁ umgeladen werden.

Wenn die in der Spule 5 gespeicherte Energie umgeladen ist, ist der Entladevorgang beendet.

Der Vorladeschalter 6a und die Auswahlwähler 11₂, 12₂, . . . 1n₂ bleiben jedoch noch kurzzeitig geöffnet, damit der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente 11₁, 12₁, . . . 1n₁ wie in der Vorladestufe auf die erste Spannung aufgeladen werden können. Dieses dem Vorladen ähnliche Nachladen ist erforderlich, weil das Laden und Entladen der piezoelektrischen Elemente zwar verlustarm, aber nicht gänzlich verlustfrei bewerkstellbar ist.

Wenn der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente 11₁, 12₁, . . . 1n₁ auf die erste Spannung aufgeladen sind, werden der Vorladeschalter 6a und die Auswahlwähler 11₂, 12₂, . . . 1n₂ wieder geöffnet. Die Anordnung ist dadurch für eine nächste Hauptladestufe zum Laden des selben oder eines anderen der piezoelektrischen Elemente vorbereitet.

Betreibt man die in der Fig. 1 gezeigte Schaltung, genauer gesagt das Laden und Entladen einer der vorhandenen piezoelektrischen Elemente wie vorstehend beschrieben, so stellen sich die in der Fig. 2 gezeigten Strom- und Spannungsverläufe ein. Die gezeigten Strom- und Spannungsverläufe sind das Ergebnis einer Simulation, in welcher die piezoelektrischen Elemente als reine Kapazitäten modelliert wurden.

Die in der Fig. 2 oben und in der Mitte dargestellten Kurven sind mit deren Meßgrößen repräsentierenden Symbolen versehen. Von den verwendeten Symbolen repräsentieren

□ die sich am piezoelektrischen Element 11₁ einstellende Spannung U_{p1} ,

◇ die sich am piezoelektrischen Element 12₁ einstellende Spannung U_{p2} ,

▽ die sich am piezoelektrischen Element 1n₁ einstellende Spannung U_{pn} ,

○ den die Spule 5 durchfließenden (Umlade-)Strom.

Im in der Fig. 2 unten dargestellten Diagramm sind die jeweiligen Schalterstellungen veranschaulicht.

Die in der Fig. 2 gezeigten Strom- und Spannungsverläufe veranschaulichen den Ladevorgang (genauer gesagt den ersten Hauptladestufen-Teilschritt im Bereich von etwa 75 µs bis 250 µs auf der Zeitskala, den zweiten Hauptladestufen-Teilschritt im Bereich von etwa 250 µs bis 350 µs auf der Zeitskala, und die Vor- bzw. Nachladestufe im Bereich von etwa 600 µs bis 775 µs auf der Zeitskala) und den Entladevorgang (genauer gesagt den ersten Entlade-Teilschritt im Bereich von etwa 500 µs bis 600 µs, und den (mit dem Vor- bzw. Nachladeschritt zusammenfallenden) zweiten Entlade-Teilschritt im Bereich von etwa 600 µs bis 775 µs) eines piezoelektrischen Elements; die gezeigten Strom- und Spannungsverläufe sind bei der vorstehend vermittelten Kenntnis des Aufbaus, der Funktion und der Wirkungsweise der Schaltung gemäß der Fig. 1 ohne weiteres verständlich und bedürften keiner näheren Erläuterung.

Wie aus der Fig. 2 ersichtlich ist, weist die sich am zu la-

denden und entladenden piezoelektrischen Element einstellende Spannung einen äußerst homogenen Verlauf auf.

Gleichzeitig ist die Schaltung, durch die das Laden und Entladen bewirkt wird, genauer gesagt die Schaltung gemäß Fig. 1 denkbar einfach aufgebaut und optimal im Wirkungsgrad. Hierzu tragen insbesondere vier Faktoren bei, nämlich

- 1) daß das Laden und Entladen der piezoelektrischen Elemente im wesentlichen durch ein Umladen erfolgt,
- 2) daß eine Vielzahl von piezoelektrischen Elementen über eine einzige Endstufe (Schaltung gemäß Fig. 1) geladen und entladen werden kann,
- 3) daß das Laden und das Entladen über ein und die selbe Spule (nämlich die Spule 5) erfolgt, und
- 4) die Wärmezeugung in ohmschen Widerständen vernachlässigbar gering ist.

Der erstgenannte Punkt ermöglicht es, die durch die Versorgungsspannungsquelle abzugebende Energie gering zu halten, wobei auch kurzzeitig hohe Belastungen vermeidbar sind. Dadurch kann die Versorgungsspannungsquelle, genauer gesagt die Batterie 2 und der Gleichspannungswandler 3 für nur relativ kleine Leistungen ausgelegt und mithin relativ klein im Aufbau gemacht werden. Aufgrund der Tatsache, daß das Umladen zumindest teilweise zwischen den vorhandenen piezoelektrischen Elementen erfolgt, kann auch der Kondensator 4 sehr klein gemacht werden oder sogar gänzlich entfallen. Dies ist insofern vorteilhaft, als Leistungskondensatoren im Automotive-Bereich als kritische Bauteile gelten (geringe Schüttelbelastbarkeit, kurze Lebensdauer bei hohen Temperaturen).

Der zweite und der dritte der oben genannten Punkte ermöglichen es, die Anzahl der Bauelemente, insbesondere die Anzahl der von Haus aus relativ großen Spulen minimal zu halten, wodurch sich erkennbar eine weitere Minimierung der Schaltungsgröße erzielen läßt.

Durch den vierten der oben genannten Punkte kann einerseits der Energieverbrauch gering gehalten und andererseits auf Kühlmaßnahmen verzichtet werden, was sich erkennbar ebenfalls vorteilhaft auf die Größe der betrachteten Anordnung auswirkt.

Sämtliche der genannten Punkte – sei es allein oder in Kombination – ermöglichen es oder tragen zumindest dazu bei, die zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen vorzuziehende Schaltung auf kleinstem Raum unterzubringen und die Kosten für deren Herstellung und Betrieb minimal zu halten.

Die Schaltung gemäß Fig. 1 ist unter Beibehaltung deren wesentlicher Funktion und Wirkungsweise in verschiedenerlei Hinsicht abwandellbar. Eine der möglichen Abwandlungen ist in Fig. 3 veranschaulicht.

Die Fig. 3 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Schaltung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Die in der Fig. 3 gezeigte Schaltung entspricht teilweise der in der Fig. 1 gezeigten und vorstehend bereits ausführlich beschriebenen Schaltung; einander entsprechende Elemente sind mit den selben Bezugszeichen bezeichnet.

Der Unterschied zwischen den Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 3 besteht im wesentlichen darin, daß das beim Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements erfolgende Verschieben von Ladungsträgern zum zu ladenden bzw. vom zu entladenden piezoelektrischen Element bei der Schaltung gemäß der Fig. 1 über die Spule 5, und bei der Schaltung gemäß der Fig. 3 über einen Übertrager 15 erfolgt.

Das piezoelektrische Element, das es zu laden bzw. zu entladen gilt, ist wiederum ein aus einer Vielzahl piezoelek-

trischen Elementen auswählbares piezoelektrisches Element, wobei die vielen piezoelektrischen Elemente wie bei der Schaltung gemäß Fig. 1 in parallel geschalteten Piezozweigen $11, 12, \dots 1n$ enthalten und mit den Bezugszeichen $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ bezeichnet sind.

Jeder der Piezozweige $11, 12, \dots 1n$ enthält auch wieder Auswahlshalter $11_2, 12_2, \dots 1n_2$ mit parallel angeordneten Dioden $11_3, 12_3, \dots 1n_3$.

Die Versorgungsspannungsquelle wird wiederum durch eine Batterie 2 (beispielsweise eine Kraftfahrzeug-Batterie) und einen nachgeschalteten Gleichspannungswandler 3 gebildet, wobei der Gleichspannungswandler 3 die Batteriespannung (beispielsweise 12V) in eine beliebige andere Gleichspannung umsetzt.

Die Schaltung gemäß der Fig. 3 weist in Übereinstimmung mit der Schaltung gemäß Fig. 1 auch den bekannten Kondensator 4, den Vorladeschalter 6a und die Diode 6b auf.

Bis hierher sind die Schaltungen gemäß den Fig. 1 und 3 identisch.

Anders als die Schaltung gemäß Fig. 1 weist die Schaltung gemäß Fig. 3 zusätzlich zu den genannten Elementen den vorstehend bereits erwähnten Übertrager 15, einen Hauptlade- und Entladeschalter 16 sowie Dioden 17 und 18 auf, die wie in der Fig. 3 gezeigt verschaltet sind.

Der Aufbau der Schaltung gemäß Fig. 3 läßt sich am einfachsten anhand deren Funktion und Wirkungsweise beim Laden und Entladen eines der piezoelektrischen Elemente beschreiben und nachvollziehen.

Die Funktion und die Wirkungsweise der Schaltung gemäß Fig. 3 werden nun anhand des Ladens und des Entladens des piezoelektrischen Elements 11_1 beschrieben.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist ein Zustand, in dem sämtliche Schalter geöffnet und die piezoelektrischen Elemente sowie der Kondensator im wesentlichen entladen sind.

Das Laden des piezoelektrischen Elements 11_1 erfolgt in zwei Stufen, genauer gesagt in einer Vorladestufe und einer sich unmittelbar oder beliebig später daran anschließenden Hauptladestufe.

Die Vorladestufe wird durch das Schließen des Vorladeschalters 6a und der Auswahlshalter $11_2, 12_2, \dots 1n_2$ eingeleitet. Das Schließen der besagten Schalter bewirkt, daß der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ parallel geschaltet und mit dem Gleichspannungswandler 3 verbunden werden. Dadurch werden der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ auf eine erste (niedrige) Spannung aufgeladen.

Die besagte erste Spannung ist so bemessen, daß einerseits die darauf aufgeladenen piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ noch nicht als Aktoren bzw. Stellglieder wirken, und daß andererseits die dadurch im Kondensator 4 und den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ gespeicherte Energie ausreicht, um eines der piezoelektrischen Elemente vollständig (wünschgemäß weit) aufzuladen.

Nach dem Laden des Kondensators 4 und der piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ auf die erste Spannung werden der Vorladeschalter 6a und die Auswahlshalter $11_2, 12_2, \dots 1n_2$ wieder geöffnet. Dadurch werden der Kondensator 4 und die piezoelektrischen Elemente $11, 12, \dots 1n$ voneinander und vom Gleichspannungswandler 3 getrennt.

Die im Kondensator 4 und in den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ gespeicherten Ladungen bleiben dort im wesentlichen unverändert erhalten.

Ausgehend von diesem Zustand kann nun zu einem beliebigen Zeitpunkt das vollständige Laden des piezoelektrischen Elements 11_1 (oder eines beliebigen anderen der piezoelektrischen Elemente) durchgeführt werden. Dies ge-

schieht in der vorstehend bereits erwähnten Hauptladestufe.

Die Hauptladestufe umfaßt zwei Teilschritte; sie, genauer gesagt der erste Teil schritt derselben wird durch ein Schließen des Hauptlade- und Entladeschalters 16 eingeleitet. Das Schließen dieses Schalters bewirkt die Ausbildung eines ersten und eines zweiten geschlossenen Umladestromkreises, wobei der erste Umladestromkreis aus einer Reihenschaltung des Kondensators 4, der Diode 6b, der Diode 17 und einer ersten Wicklung des Übertragers 15 besteht, und wobei der zweite Umladestromkreis aus einer Reihenschaltung der parallelen Piezozweige $11, 12, \dots 1n$, der Diode 17 und der ersten Wicklung des Übertragers 15 besteht.

In den Umladestromkreisen stellt sich durch das Schließen derselben ein (Umlade-)Stromfluß ein, durch den die im Kondensator 4 und in den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ gespeicherten Ladungen (gespeicherte elektrische Energie) zum Übertrager 15 fließen und dort in Form von magnetischer Energie gespeichert werden. Der Übertrager ist vorzugsweise so dimensioniert, daß die gesamte elektrische Energie des Kondensators 4 und der piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ in diesem speicherbar ist. Wenn die gesamte elektrische Energie oder wünschgemäß viel Energie aus dem Kondensator 4 und den piezoelektrischen Elementen $11_1, 12_1, \dots 1n_1$ in den Übertrager 15 transferiert ist, wird der Hauptlade- und Entladeschalter 16 wieder geöffnet.

Mit dem Öffnen des Hauptlade- und Entladeschalters 16 endet der erste Hauptladestufen-Teilschritt und beginnt der zweite Hauptladestufen-Teilschritt.

Gleichzeitig mit dem Öffnen des Hauptlade- und Entladeschalters 16 oder schon vorher wird der Auswahlshalter des zu ladenden piezoelektrischen Elements, im betrachteten Beispiel also der dem piezoelektrischen Element 11_1 zugeordnete Auswahlshalter 11_2 geschlossen; dadurch wird ein Schließen eines das piezoelektrische Element 11_1 , die Diode 18 und eine zweite Wicklung des Übertragers 15 enthaltenden Ladestromkreises bewirkt.

In diesem Ladestromkreis stellt sich auf das Öffnen des Hauptlade- und Entladeschalters 16 ein (Lade-)Stromfluß ein, durch welchen die im Übertrager 15 gespeicherte Energie in das zu ladende piezoelektrische Element 11_1 umgeladen wird.

Durch den Ladestromfluß wird das piezoelektrische Element zunehmend geladen, wodurch die sich an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zunehmen. Wie eingangs bereits angedeutet wurde, ist das piezoelektrische Element mechanisch so vorgespannt oder so angeordnet, daß es erst jetzt (im zweiten Hauptladestufen-Teilschritt) als Aktor bzw. Stellglied wirken kann; in der anfänglichen Vorladestufe blieben die Abmessungen des piezoelektrischen Elements konstant (wenn es mechanisch vorgespannt ist) bzw. Veränderungen der Abmessungen ohne Auswirkungen auf das zu betätigende oder zu verstellende Element (wenn das piezoelektrische Element so angeordnet ist, daß eine gewisse Mindestausdehnung desselben erreicht sein muß, bevor eine Betätigung oder Verstellung des zu betätigenden oder verstellenden Elements erfolgen kann).

Wenn die im Übertrager 15 gespeicherte Energie vollständig oder wünschgemäß weit in das zu ladende piezoelektrische Element umgespeichert ist, wird der Auswahlshalter 11_2 und damit auch der Ladestromkreis wieder geöffnet. Damit ist der zweite Hauptladestufen-Teilschritt und mithin der gesamte Ladevorgang beendet.

In diesem Zustand ist das piezoelektrische Element 11_1 (oder ein anderes der piezoelektrischen Elemente) im wesentlichen vollständig (wünschgemäß weit) geladen, während die anderen piezoelektrischen Elemente und der Kondensator 4 im wesentlichen vollständig entladen sind.

Die im piezoelektrischen Element 11_1 gespeicherten Ladungen, die sich dadurch am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Abmessungen des piezoelektrischen Elements bleiben in diesem Stadium (bis zum Entladen) im wesentlichen unverändert erhalten.

Das Entladen des piezoelektrischen Elements vollzieht sich wie die Hauptladestufe in zwei Teilschritten; es, genauer gesagt der erste Entlade-Teilschritt wird durch ein Schließen des Hauptlade- und Entladeschalters **16** eingeleitet. Das Schließen dieses Schalters bewirkt das erneute Schließen des ersten und des zweiten Umladestromkreises.

In den Umladestromkreisen stellt sich dadurch ein (Umlade-) Stromfluß ein, durch den die im geladenen piezoelektrischen Element 11_1 gespeicherten Ladungen (gespeicherte elektrische Energie) über die Diode 11_3 zum Übertrager **15** fließen und dort in Form von magnetischer Energie gespeichert werden.

Durch das Umladen nehmen die sich am piezoelektrischen Element 11_1 einstellende Spannung und die äußeren Abmessungen ab.

Wenn die gesamte elektrische Energie des piezoelektrischen Elements 11_1 in den Übertrager **15** transferiert ist, wird der Hauptlade- und Entladeschalter **16** wieder geöffnet.

Mit dem Öffnen des Hauptlade- und Entladeschalters **16** endet der erste Entlade-Teilschritt und beginnt der zweite Entlade-Teilschritt.

Gleichzeitig mit dem Öffnen des Hauptlade- und Entladeschalters **16** oder schon vorher werden der Vorladeschalter **6a** und alle Auswahlschalter $11_2, 12_2, \dots, 1n_2$ geschlossen; dadurch kann die im Übertrager **15** gespeicherte Energie in den Kondensator **4** und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ umgeladen werden.

Wenn die im Übertrager **15** gespeicherte Energie umgeladen ist, ist der Entladevorgang beendet.

Der Vorladeschalter **6a** und die Auswahlschalter $11_2, 12_2, \dots, 1n_2$ bleiben jedoch noch kurzzeitig geöffnet, damit der Kondensator **4** und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ wie in der Vorladestufe auf die erste Spannung aufgeladen werden können. Dieses dem Vorladen ähnliche Nachladen ist erforderlich, weil das Laden und Entladen der piezoelektrischen Elemente zwar verlustarm, aber nicht gänzlich verlustfrei bewerkstelligbar ist.

Wenn der Kondensator **4** und die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ auf die erste Spannung aufgeladen sind, werden der Vorladeschalter **6a** und die Auswahlschalter $11_2, 12_2, \dots, 1n_2$ wieder geöffnet. Die Anordnung ist dadurch für eine nächste Hauptladestufe zum Laden desselben oder eines anderen der piezoelektrischen Elemente vorbereitet.

Betreibt man die in der **Fig. 3** gezeigte Schaltung, um die piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$ aufeinanderfolgend zur Durchführung einer Voreinspritzung und einer sich daran anschließenden Haupteinspritzung zu laden und zu entladen, so stellen sich die in der **Fig. 4** gezeigten Strom- und Spannungsverläufe ein. Die gezeigten Strom- und Spannungsverläufe sind das Ergebnis einer Simulation, in welcher die piezoelektrischen Elemente als reine Kapazitäten modelliert wurden.

Die in der **Fig. 4** dargestellten Kurven sind mit deren Meßgrößen repräsentierenden Symbolen versehen. Von den verwendeten Symbolen repräsentieren

in dem gemäß der **Fig. 4** oberen Diagramm

- den die Diode **18** durchfließenden (Umlade-)Strom, und
- ◇ den die Diode **17** durchfließenden (Umlade-)Strom, und

in dem gemäß der **Fig. 4** unteren Diagramm

□ die sich am piezoelektrischen Element 11_1 einstellende Spannung U_{p1} ,

◇ die sich am piezoelektrischen Element 12_1 einstellende Spannung U_{p2} , und

- 5 ∇ die sich am piezoelektrischen Element $1n_1$ einstellende Spannung U_{pn} .

In der gemäß der **Fig. 4** unteren Darstellung bezeichnen

- 10 U₀ die sich an den jeweiligen piezoelektrischen Elementen einstellende Spannung, wenn sie vollständig (wünschgemäß) geladen sind,

U₁ die vorstehend bereits erwähnte erste Spannung, auf die die piezoelektrischen Elemente und der Kondensator beim Vor- und Nachladen geladen werden, und

- 15 U₂ eine zweite Spannung, auf die die nicht geladenen piezoelektrischen Elemente und der Kondensator durch das Entladen (Umladen) eines geladenen piezoelektrischen Elements geladen werden.

20

Die in der **Fig. 4** gezeigten Strom- und Spannungsverläufe veranschaulichen den Ladevorgang und den Entladevorgang der piezoelektrischen Elemente $11_1, 12_1, \dots, 1n_1$, wobei zunächst das piezoelektrische Element 11_1 , dann das piezoelektrische Element 12_1 , und dann das piezoelektrische Element $1n_1$ aufeinanderfolgend je zwei mal geladen und entladen werden (um eine Voreinspritzung und eine sich daran anschließende Haupteinspritzung durchzuführen).

- 25 Wie aus der **Fig. 4** ersichtlich ist, weist die sich am zu ladenden und entladenden piezoelektrischen Element einstellende Spannung einen äußerst homogenen und gut steuerbaren Verlauf auf.

Gleichzeitig ist die Schaltung, durch die das Laden und Entladen bewirkt wird, genauer gesagt die Schaltung gemäß **Fig. 3** denkbar einfach aufgebaut und optimal im Wirkungsgrad. Diesbezüglich herrscht Übereinstimmung mit den entsprechenden Ausführungen zur Schaltung gemäß **Fig. 1** (wenn das zur Spule **5** Gesagte auf den Übertrager **15** übertragen wird); zur Vermeidung von Wiederholungen wird daher auf die dortigen Ausführungen verwiesen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es beide Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des erfindungsgemäßen Verfahrens auf einfache und elegante Art und Weise ermöglichen, auch unter beengten Verhältnissen ein effizientes Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente durchzuführen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots, 1n_1$), **dadurch gekennzeichnet**, daß wenigstens entweder das Laden oder das Entladen zumindest teilweise unter Verschieben von Ladungen zwischen dem zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element und einem oder mehreren nicht zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element(en) erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Verschieben der Ladungen unter Zwischenspeicherung deren Energie in einem als Induktanz wirkenden Element (**5**; **15**) erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als als Induktanz wirkendes Element (**5**; **15**) eine Spule (**5**) verwendet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als als Induktanz wirkendes Element (**5**; **15**) ein Übertrager (**15**) verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, da-

durch gekennzeichnet, daß das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) über das selbe als Induktanz wirkende Element (5; 15) erfolgen.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens bei der Inbetriebnahme der Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens oder nach dem Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) eine Vor- bzw. Nachladung ausgeführt wird, in welcher zumindest die vorhandenen piezoelektrischen Elemente auf eine erste Spannung (U_1) aufgeladen werden, welche kleiner ist als eine Schwellenspannung, von der an die piezoelektrischen Elemente als Aktoren oder Stellglieder wirken können.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die piezoelektrischen Elemente ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) mechanisch derart vorgespannt werden, daß deren Abmessungen durch das Vorladen nicht verändert werden.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die piezoelektrischen Elemente ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) derart eingesetzt werden, daß während des Vorladens auftretende Abmessungs-Veränderungen nicht ausreichen, um ein im wunschgemäß geladenen Zustand des betreffenden piezoelektrischen Elements zu betätigendes oder verstellendes Element zu betätigen oder zu verstellen.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) in zwei Teilschritten erfolgt, wobei im ersten Teilschritt wenigstens die in den vorgeladenen piezoelektrischen Elementen gespeicherte Energie einem Energiespeicherelement zugeführt und dort gespeichert wird, und wobei im zweiten Teilschritt die im Energiespeicherelement gespeicherte Energie dem zu ladenden piezoelektrischen Element zugeführt wird.

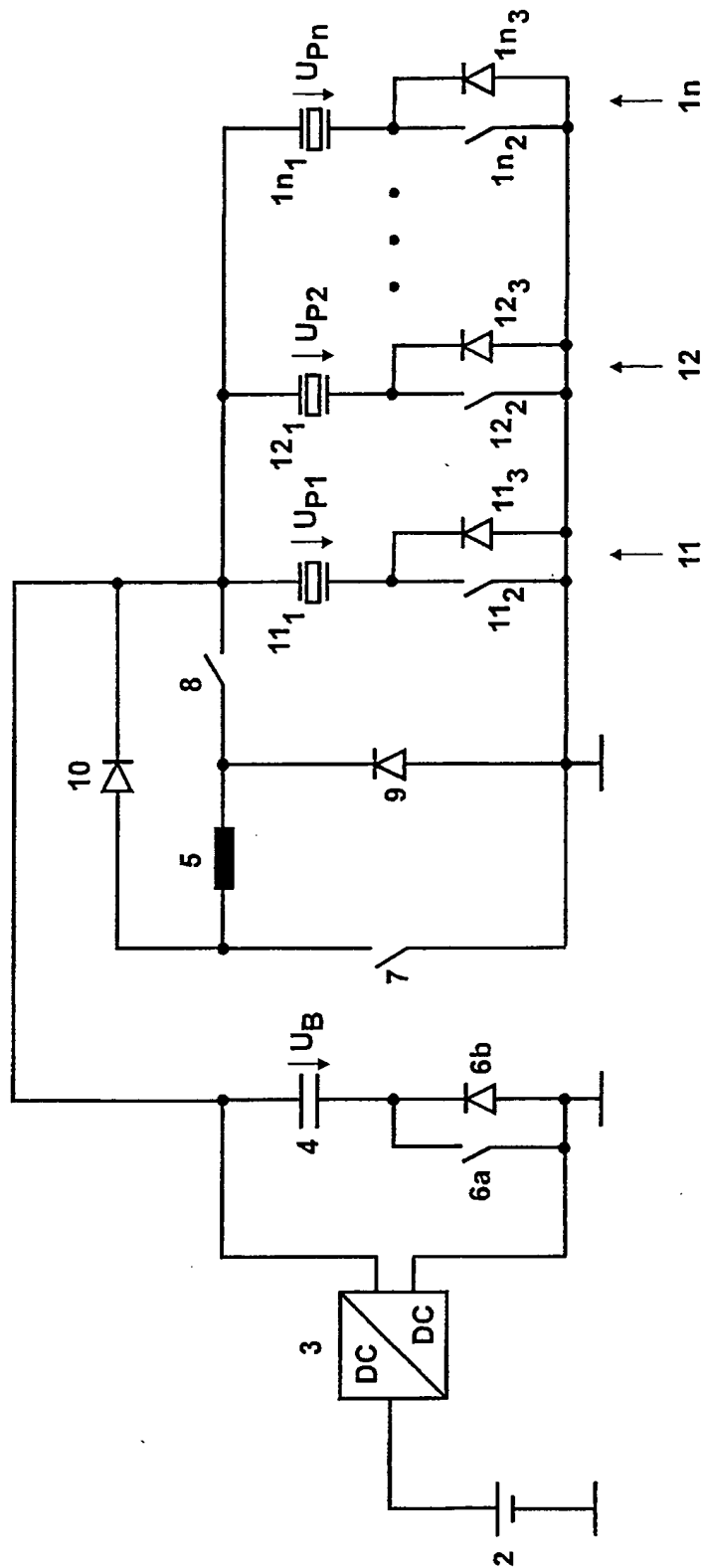
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Entladen eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$) in zwei Teilschritten erfolgt, wobei im ersten Teilschritt wenigstens die im geladenen piezoelektrischen Element gespeicherte Energie einem Energiespeicherelement zugeführt und dort gespeichert wird, und wobei im zweiten Teilschritt die im Energiespeicherelement gespeicherte Energie zumindest auf die vorhandenen piezoelektrischen Elemente verteilt wird.

11. Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements ($11_1, 12_1, \dots 1n_1$), gekennzeichnet durch Mittel, welche es ermöglichen, daß wenigstens entweder das Laden oder das Entladen zumindest teilweise unter Verschieben von Ladungen zwischen dem zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element und einem oder mehreren nicht zu ladenden oder entladenden piezoelektrischen Element(en) erfolgen kann.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

60

65

**FIG. 1**

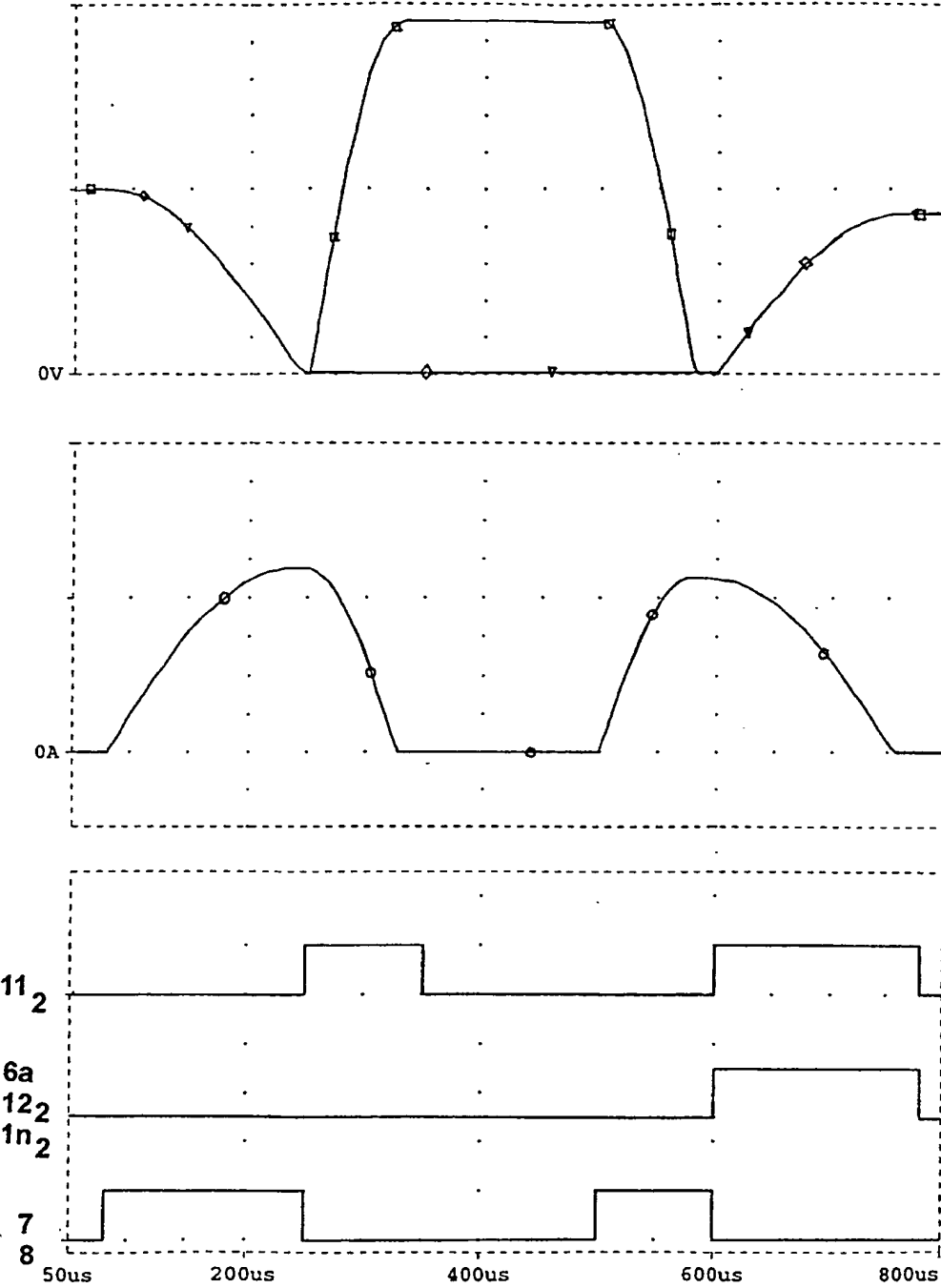


FIG. 2

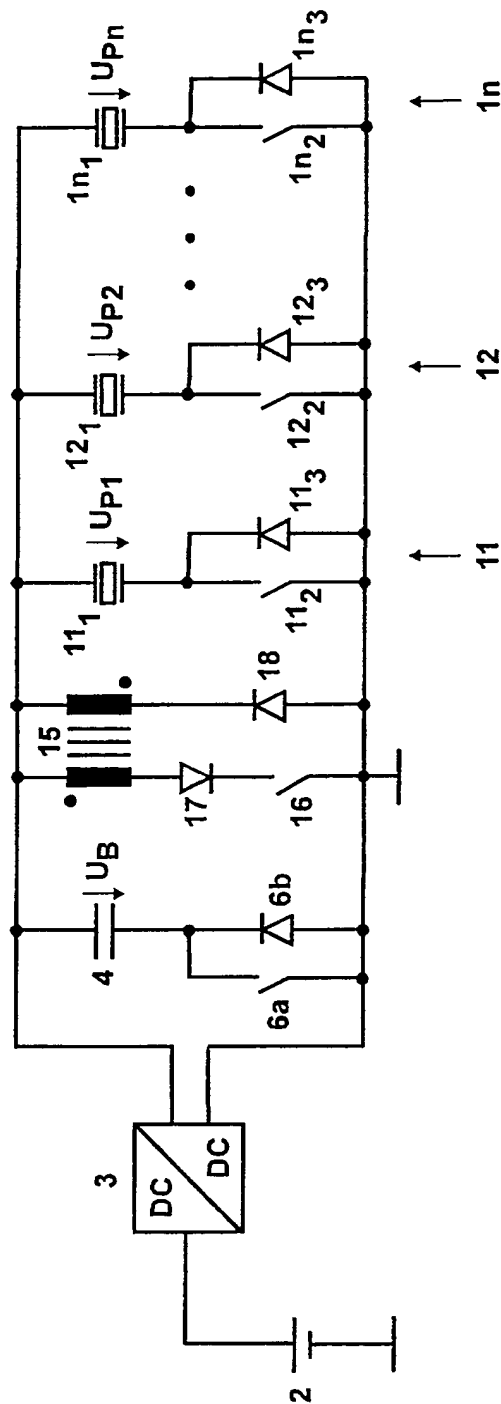


FIG. 3

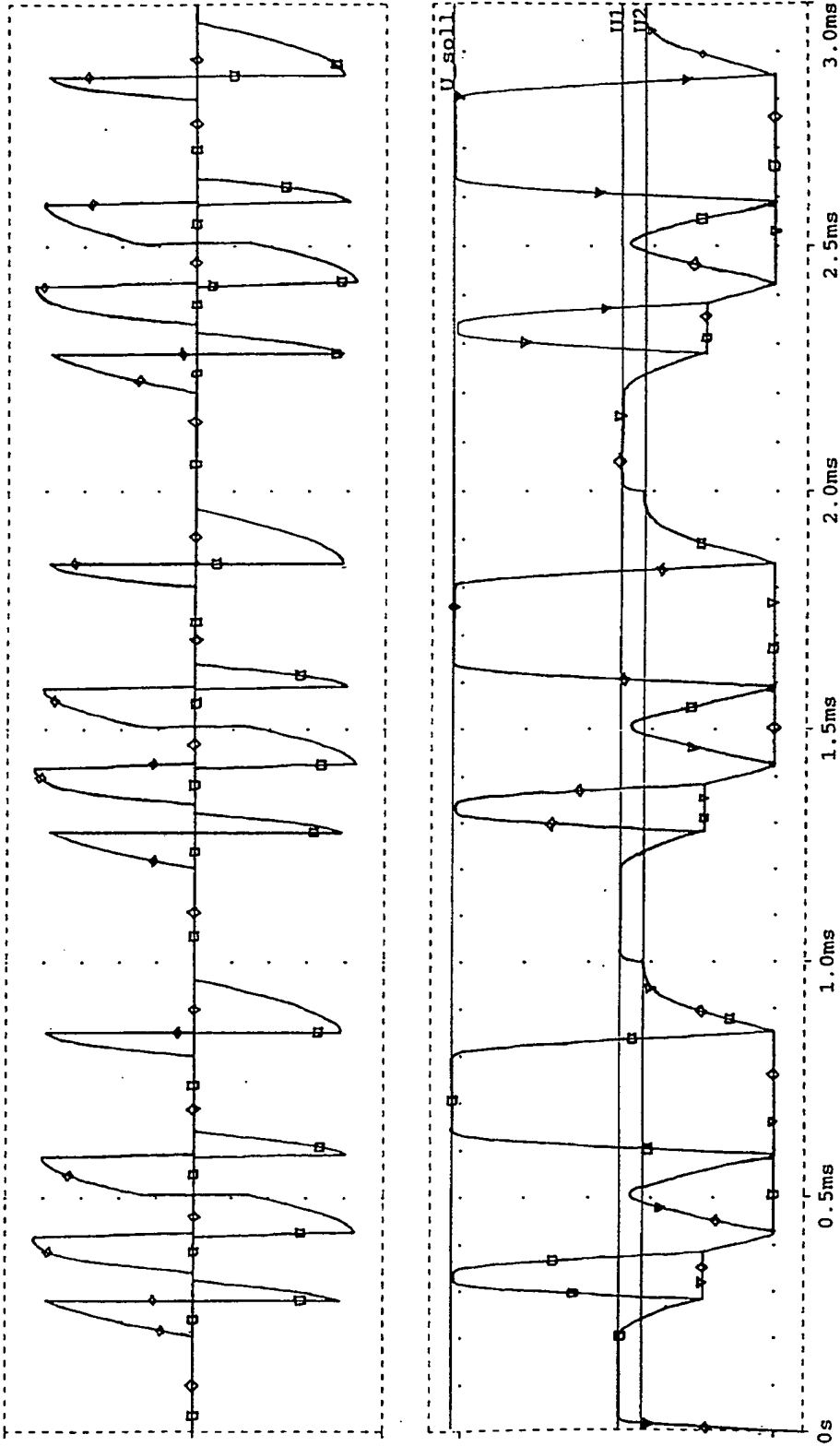


FIG. 4

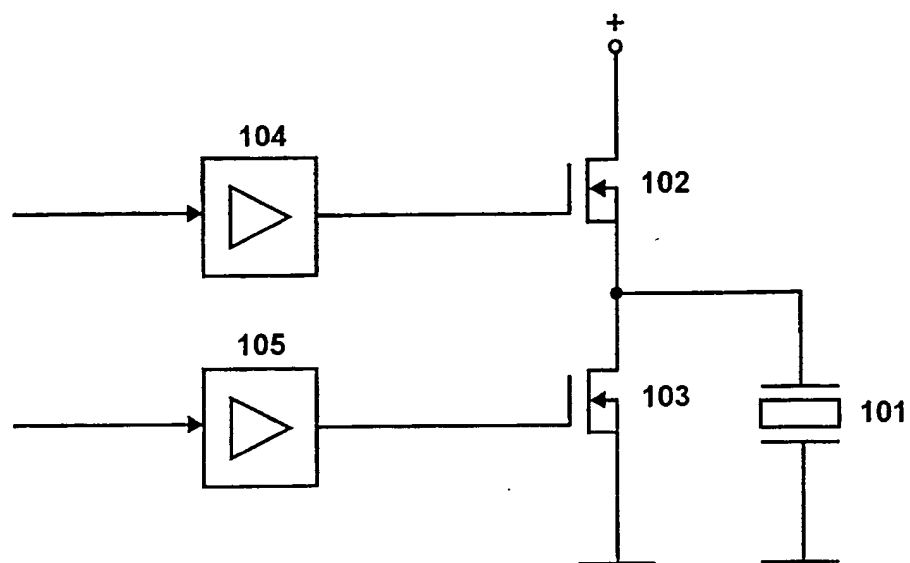


FIG. 5

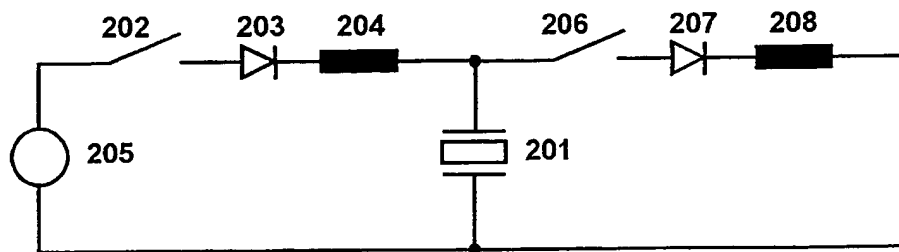


FIG. 6